

УДК 622.271.3, 550.34.016 + 550.394

**ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ СКЛОНОВ
ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Г. Г. Кочарян, С. Б. Кишкина, З. З. Шарафиев

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН,
E-mail: geospheres@idg.chph.ras.ru, Ленинский проспект, 38, корп. 1, 119334, г. Москва, Россия*

Рассмотрены результаты лабораторных экспериментов, моделирующих субгоризонтальное воздействие низкочастотной сейсмической волны на склон. Использование акселерометров позволило проследить развитие относительного движения соскальзывающей массы склона даже в тех случаях, когда визуально деформация не видна. Установлено, если максимальное ускорение в импульсе ниже определенного значения, зависящего только от прочности грунта, то склон остается устойчивым даже при высоких скоростях смещения грунта. Однократное воздействие импульсом с большим ускорением, но с низкой массовой скоростью, также не инициирует оползень. Однако в этом случае возникают остаточные деформации, которые, накапливаясь, могут в дальнейшем перевести склон в неустойчивое состояние. При многократном воздействии критические параметры заметно снижаются по сравнению с одиночным импульсом. Особенно это касается крутых склонов с малыми коэффициентами устойчивости. Выполнен анализ параметров колебаний от землетрясений разных магнитуд, инициирующих разрушение склона в виде оползней.

Склоновые процессы, оползни, обрушение склонов, многократные воздействия, сейсмические колебания, землетрясения, взрывы

DOI: 10.15372/FTPRPI20210609

Процессы обрушения склонов привлекают внимание исследователей, специализирующихся в разных областях, — механиков [1], геологов и геофизиков [2–4], специалистов горного дела [5–8]. Ведущую роль в склоновых явлениях играют силы тяжести, инерции и сопротивления сдвигу. Запас устойчивости склона определяется его геометрией, свойствами слагающих пород, обводненностью, накопленным уровнем повреждений. При этом обрушение склона, находящегося в состоянии близком к предельному равновесию, часто бывает инициировано внешними воздействиями. К ним относятся осадки, сейсмические колебания от землетрясений и взрывов и т. д. Считается, что основная причина природных склоновых явлений на суше —

Разработка концепции экспериментов проводилась в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № АААА-А17-117112350020-9). Создание установки и проведение экспериментов выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-05-00378).

осадки [3, 4], однако в регионах даже с умеренной сейсмичностью землетрясения достаточно часто выступают в качестве триггера оползней и обвалов [3, 4, 9, 10], а также в ряде случаев обрушения бортов карьеров [7]. Внедрение новых методов разработки месторождений полезных ископаемых предусматривает высокую крутизну бортов глубоких карьеров.

Огромные объемы отвалов размещаются в пределах землеотвода вблизи участков проведения массовых взрывов, мощность которых на современных карьерах достигает сотен, а иногда и тысяч тонн взрывчатых веществ. Высота отвалов на месторождениях Курской магнитной аномалии составляет 170 м, углы откоса для рыхлых пород — 33° , для отвалов скальных пород — 38° . За последние 30 лет в результате нарушения устойчивости склона на отвалах Михайловского ГОКа дважды сходили оползни объемом ~ 20 млн м^3 [10]. Все это делает актуальной проблему многократного сейсмического воздействия массовых взрывов, применяемых при разработке месторождения, на устойчивость склонов [7, 10].

В горном деле широко используется квазистатический метод оценки запаса устойчивости склона или борта карьера, основанный на анализе условий предельного равновесия [6]. Количественный показатель степени устойчивости — коэффициент устойчивости FS , равный отношению сумм всех удерживающих R и сдвигающих T сил. В качестве поверхности скольжения обычно принимается криволинейная поверхность второго порядка либо наклонная плоскость.

Основные формулы расчета коэффициента устойчивости склона, состоящего из однородного материала, можно найти в инженерных руководствах и нормативных документах [11]. Склон или его морфологический элемент считается устойчивым, если $FS > 1$. При учете сейсмического воздействия в квазистатическом приближении определяется, как обычно, запас статической устойчивости, а к системе сил добавляются инерционные силы, обусловленные ускорениями в сейсмической волне. В расчетах предполагается постоянное действие инерционных сил. Критическим является ускорение a_c , при котором фактор устойчивости $FS = 1$.

Наблюдения подтверждают, что определенная таким образом величина a_c оказывается сильно переоцененной, в расчетах при учете инерциальных сил часто вводят поправочный коэффициент $\sim 0.1 - 0.5$ к максимальному значению горизонтального ускорения в сейсмической волне [11]. С другой стороны, квазистатический подход не учитывает того, что действие сейсмической волны может создать начальный сдвиг в критической области и/или изменить характеристики поверхности скольжения, например благодаря фрикционному разупрочнению при сдвиге [12].

Эти эффекты в известной мере учитываются широко применяемым, особенно за рубежом, подходом Ньюмарка [1], при котором тело оползня рассматривается в виде жесткого блока на наклонном основании. Причина данного упрощения — то обстоятельство, что закономерности обрушения в значительной степени определяются наличием литологических границ, естественных поверхностей скольжения и неоднородностей, сформированных на стадии статического предразрушения массива. Следовательно, приближение “сдвига целого блока” по границам существующих пластов или по вновь образованным структурным нарушениям, субпараллельным поверхности склона, представляется вполне оправданным.

Согласно [1], оползень не будет инициирован до тех пор, пока не наберется некоторое критическое значение перемещения D_N потенциально неустойчивой массы относительно основания. При этом перемещения, до определенного момента дискретные, происходят, когда ускорение, вызванное сейсмическим воздействием, превышает критическое ускорение a_c , рассчитанное исходя из условия статического равновесия. За прошедшие десятилетия метод испытал множество усовершенствований, которые не привели к качественно новым результатам.

Наибольшую проблему представляет неопределенность критического смещения D_N . Для грунтовых откосов, подвергшихся воздействию сейсмических колебаний от землетрясений, эмпирически установлена консервативная оценка смещения для когерентных оползней (движение одним блоком), необходимого для начала разрушения $D_N \sim 10$ см [3, 4]. Это значение неплохо согласуется и с результатами численных расчетов обрушения склонов методом дискретных элементов [13]. Для камнепадов и лавин предлагается $D_N = 2$ см [3, 4]. Для воздействия сейсмозрывных волн на борта карьеров критические смещения пока не установлены.

Цель настоящей работы — лабораторное исследование механики инициирования оползня склона динамическим импульсом для определения условий возникновения скольжения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Закономерности формирования движения массы относительно склона довольно сложно проследить при действии длинного цуга колебаний. При воздействии коротким импульсом в эксперименте могут быть исследованы как этап небольших дискретных перемещений, так и стадия формирования безостановочного скольжения сползающего материала. В то же время механика инициирования оползня коротким импульсом без труда может быть распространена и на длинный цуг колебаний. В этой связи разработана методика проведения лабораторных опытов и созданы установки для исследования инициирования неустойчивости склонов при субвертикальном и субгоризонтальном импульсном воздействии. В данной работе рассматриваются результаты некоторых серий опытов на горизонтальной установке. Детальное описание конструкции установок и методики исследований можно найти в [14, 15]. Здесь обозначим лишь необходимые сведения.

При проведении лабораторных экспериментов возникает вопрос о выполнении критериев подобия. Известно, чтобы процесс в модели был аналогичен процессу в природе, необходимо и достаточно выполнение условий геометрического, кинематического и динамического подобия.

Геометрическое подобие обеспечивается тогда, когда все линейные размеры модели l_m пропорционально уменьшены по отношению к соответствующим размерам l_n натурального объекта $C_l = l_m / l_n$. Величины с индексами n и m относятся соответственно к природному объекту и к модели. Кинематическое подобие требует, чтобы сходные частицы, двигаясь по геометрически подобным траекториям, проходили геометрически подобные пути в промежутки времени, отличающиеся постоянным множителем $t_n^i / t_m^i = C_t$, где t_n^i , t_m^i — промежутки времени в природе и в модели. Если множитель подобия C_t уже задан геометрическим подобием, то при соотношении плотностей $C_\rho = \rho_n / \rho_m$, скоростях движения частиц v_m и v_n , действующих силах p_m и p_n должно выполняться уравнение связей между множителями подобия [16]:

$$\frac{P_n}{\rho_n l_n^2 v_n^1} = \frac{P_m}{\rho_m l_m^2 v_m^1} = idem. \quad (1)$$

В этом случае динамические процессы в модели подобны соответствующим процессам в природе. В первом приближении при рассмотрении сил, действующих на склон, можно ограничиться силами тяжести, инерции и трения. Заменяя в (1) значения скоростей через ускорения и длины

$$\frac{P_n}{\rho_n l_n^3 a_n} = \frac{P_m}{\rho_m l_m^3 a_m} = idem$$

и обозначая $p / l^2 = N$, получаем

$$\frac{N_n}{\rho_n a_n l_n} = \frac{N_m}{\rho_m a_m l_m} = idem, \quad (2)$$

где N — прочностные или упругие характеристики материала.

Описывая статическую устойчивость склона, полагаем $a_n = a_m = g$ (не рассматривается вариант использования метода центробежного моделирования), т. е. произведение $\gamma = \rho a$ — удельный вес материала. Соответственно, получаем условие динамического подобия:

$$N_m = \frac{l_m \gamma_m}{l_n \gamma_n} N_n. \quad (3)$$

Значимыми для оползневых процессов геометрическими параметрами склона являются его угол и толщина оползня (слоя или скользящего блока). Угол склона в лабораторном эксперименте легко приблизить к тем значениям, которые наблюдаются в природе. Но толщина скользящего блока/слоя будет примерно на два-три порядка отличаться от природного аналога. Тогда, выбирая в качестве определяющих характеристик коэффициент сцепления C и угол внутреннего трения φ , в соответствии с (3)

$$\left\{ \begin{array}{l} C_m = \frac{l_m \gamma_m}{l_n \gamma_n} C_n, \\ [\text{tg}(\varphi)]_m = [\text{tg}(\varphi)]_n. \end{array} \right. \quad (4)$$

В лабораторных опытах следует использовать материалы, удельный вес которых соответствует природным значениям ($\sim 20 \text{ кН/м}^3$), а сцепление на два-три порядка ниже, чем у природного материала. Если для грунтов и выветрелых пород, которые в большинстве случаев формируют оползневые склоны, характерны значения сцепления первые десятки – сотни килопаскалей, то для лабораторных экспериментов следует использовать материалы с $C_m = 0.2 - 2.0 \text{ кПа}$.

Для изготовления модели использовался кварцевый песок Люберецкого карьера со средним размером зерна $\sim 300 \text{ мкм}$, увлажненный глицерином (0.25 % по массе). Хотя свойства этого материала хорошо изучены [17], дополнительно проводился контроль угла трения и сцепления в опытах на установке прямого среза в соответствии с [18]. Значения этих характеристик составляли $\varphi = 32 \pm 2^\circ$ и $C_m = 0.9 \pm 0.2 \text{ кПа}$. Плотность материала контролировалась путем укладки по стандартной методике фиксированной массы в определенный объем и составляла $\rho = 1.63 \cdot 10^3 \text{ г/см}^3$.

При субгоризонтальном воздействии низкочастотной сейсмической волны на участке нарастания скорости до максимума материал будущего оползня движется вместе с основным телом склона. Этап инициирования движения сползающей массы относительно основания склона соответствует фазе уменьшения массовой скорости смещения грунта. В момент времени, когда ускорение торможения становится достаточно большим, чтобы преодолеть силы сцепления и силу трения, начинается движение отделившейся массы относительно склона. В зависимости от геометрии склона и угла выхода волны первоначальное движение может быть как вниз по склону, так и вверх. В случае если амплитуда смещения оказывается достаточной для фрикционного разупрочнения, происходит дальнейшее движение отделившегося материала под действием силы тяжести.

В этой связи выбрана постановка опыта, при которой склон деформируется под воздействием инерционных сил. Аналогичная постановка предложена В. Н. Родионовым и впоследствии применялась в исследовании разрушения горных выработок при низкочастотном динамическом воздействии [19].

Модель склона находилась внутри контейнера размером $60 \times 60 \times 40$ см, который стальными катками установлен на рельсы, расположенные перпендикулярно к бетонной стене с прикрепленной стальной-мишенью (рис. 1). Дно и торцевые стенки контейнера — стальные, боковые стенки и крышка — из толстого оргстекла. Во время эксперимента контейнер при помощи пневмоцилиндра разгонялся по направляющим и ударялся в мишень. Максимальная скорость разгона свыше 1 м/с (время на кадрах отсчитывается с момента удара). Изменение давления в рабочей камере пневмоцилиндра и использование разных прокладок позволяло варьировать скорость и длительность удара в широких пределах.

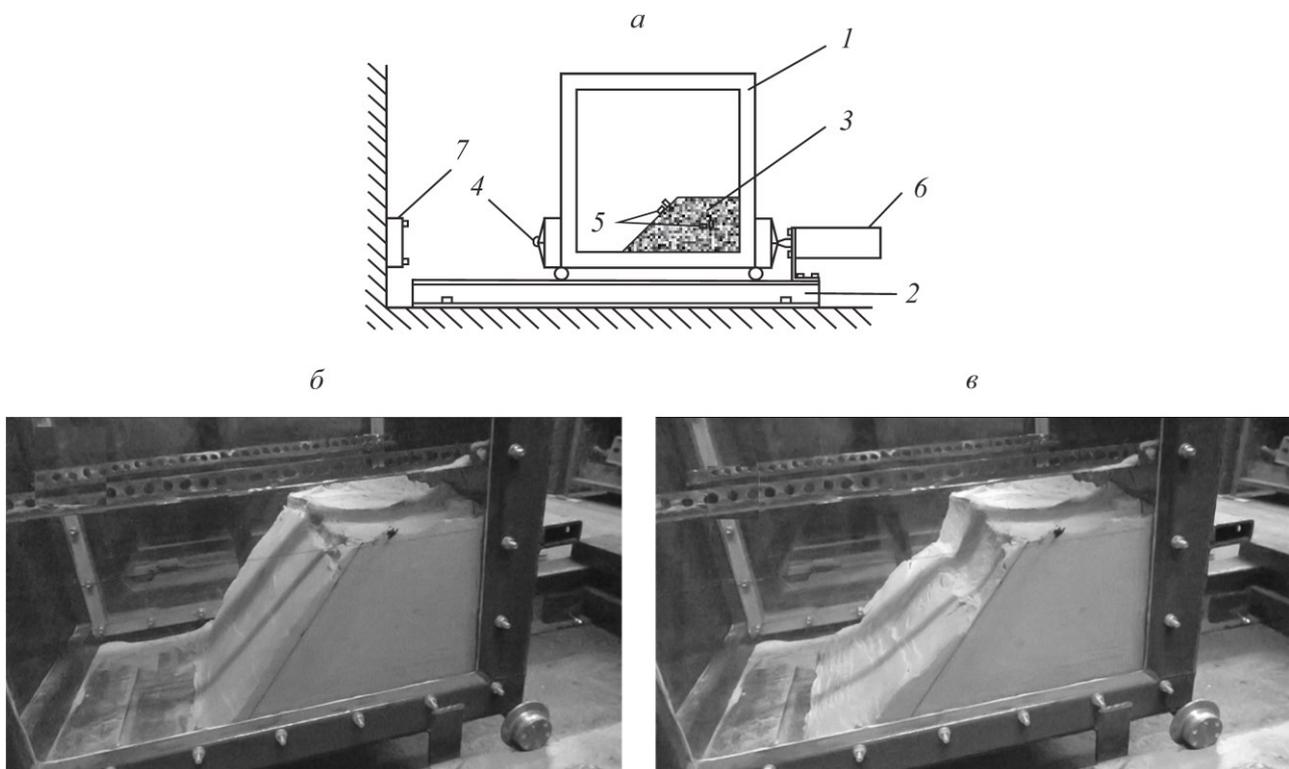


Рис. 1. Схема установки для горизонтального воздействия (а) и кадры обрушения склона при $t=0.24$ (б) и 0.61 с (в): 1 — бокс; 2 — рельсы; 3 — модель склона; 4 — ударник; 5 — акселерометры; 6 — пневмоцилиндр; 7 — стальная мишень

Параметры динамического воздействия на склон и движения оползня контролировались акселерометрами Briel & Kjaer 4370, которые устанавливались на контейнере, в глубине склона и на его поверхности (или на блоке). Поскольку плотность датчиков существенно выше, чем плотность модельного материала, к доннышку акселерометра прикреплялась специальная площадка, препятствовавшая движению корпуса датчика относительно грунта. Специально проведенная серия экспериментов позволила определить оптимальный размер площадки (ее диаметр составил 6 см), не приводящий к существенным искажениям акселерограмм. Общая картина разрушения склона фиксировалась с помощью кино- и фотосъемки.

Чтобы выбрать необходимую в эксперименте геометрию модели, предварительно рассчитывался коэффициент статической устойчивости склона FS — отношения суммы сил, удерживающих слой на склоне, к сумме сдвигающих сил. Для простейшей модели бесконечного склона (рис. 2), когда плоская поверхность скольжения параллельна откосу, FS может быть выражен как [15]

$$FS = \frac{C}{\gamma z \cos \alpha \sin \alpha} + \frac{\text{tg} \varphi}{\text{tg} \alpha}, \tag{5}$$

где α — угол склона; z — вертикальный размер скользящего слоя.

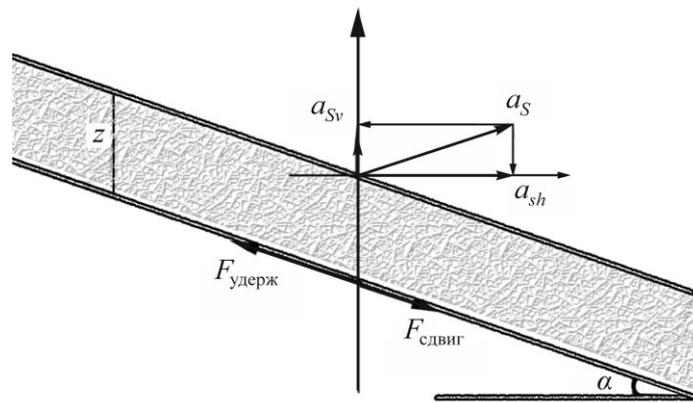


Рис. 2. Модель бесконечного склона с постоянным уклоном

Когда устанавливается баланс удерживающих и сдвигающих сил ($FS=1$), склон становится неустойчивым. Если $FS>1$, слой находится в устойчивом состоянии, при $FS<1$ — в неустойчивом.

В квазистатическом приближении воздействие сейсмической волны обычно учитывается наложением инерциальных сил, определяемых максимальным ускорением в сейсмической волне. Рассматривая баланс сил при воздействии сейсмической волны, несложно показать, что в общем случае, когда сейсмическое ускорение не параллельно склону (квазистатическое приближение; горизонтальная a_{sh} и вертикальная a_{sv} компоненты ускорения), зависимость для расчета фактора устойчивости сухого склона будет выглядеть как [15]

$$FS = \frac{C + (1 - a_{sv} - a_{sh} \text{tg} \alpha) \gamma z \cos^2 \alpha \text{tg} \varphi}{\left(1 - a_{sv} + \frac{a_{sh}}{\text{tg} \alpha}\right) \gamma z \sin \alpha \cos \alpha}.$$

В этом выражении и далее, там, где не оговаривается иное, ускорения нормированы на ускорение силы тяжести.

Деформации пласта, направленные вдоль склона, возникают в моменты, когда ускорение соскальзывающего слоя массы W , вызванное сейсмическими колебаниями, превышает критическое ускорение a_c , при котором выполняется соотношение $FS=1$, т. е. увеличение ускорения силы тяжести g на a_c делает склон статически неустойчивым. Критическое ускорение в сейсмической волне, субпараллельное наклону потенциального оползневой блока, в квазистатическом приближении является простой функцией статического фактора устойчивости и геометрии склона [1, 3]:

$$a_c = (FS - 1) \sin \alpha. \quad (6)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Опыты с однократным воздействием. Считалось, что оползень инициирован в тех случаях, когда имело место сползание материала по всей ширине склона. Если наблюдались лишь локальные осыпания грунта, то полагалось, что склон сохранил устойчивость. При относительно небольших амплитудах воздействия могли формироваться трещины, субпараллельные кромке склона, но оползень при этом не образовывался. Отделившиеся части склона обрушались в результате одного или нескольких повторных воздействий.

Использование акселерометров и лазерных датчиков перемещения позволяло проследить развитие относительного движения соскальзывающей массы даже в тех случаях, когда визуально деформация не видна. На рис. 3 показаны примеры графиков скорости движения грунта, полученные путем интегрирования ускорения, в двух опытах. В первом случае склон остался устойчивым (рис. 3а), во втором — произошло обрушение (рис. 3б).

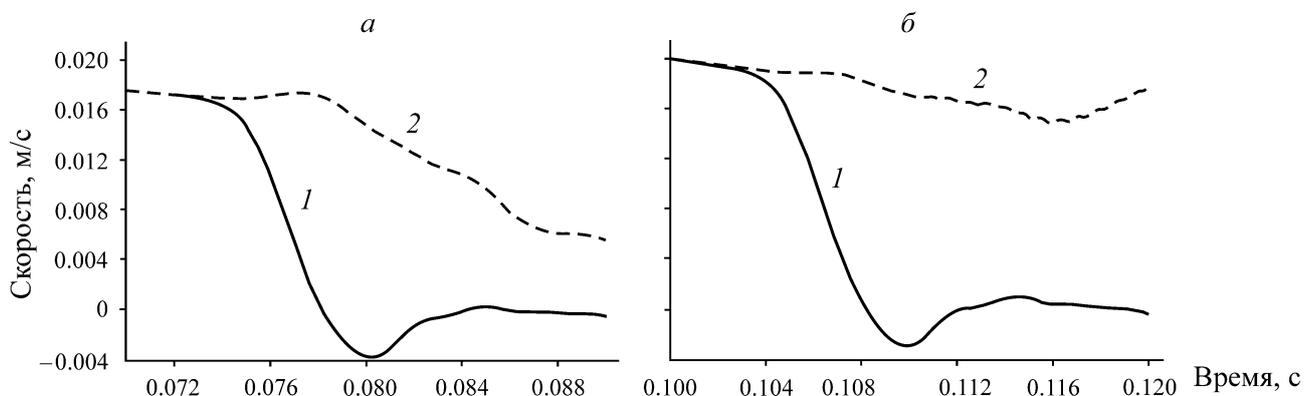


Рис. 3. Примеры изменения скорости движения грунта на сохранившем устойчивость (а) и разрушившемся (б) склоне. Акселерометры расположены параллельно поверхности склона внутри (1) и на поверхности (2) модели

В начале записи значения скорости движения грунта соответствуют скорости движения контейнера перед соударением с преградой. После удара тело оползня начинает двигаться относительно склона. На рис. 3а видно, что после некоторого перемещения материал останавливается, на рис. 3б развивается обрушение. В этих опытах параметры воздействия (PGV — максимальная скорость смещения грунта и PGA — максимальное ускорение движения грунта) близки, однако в одном случае неустойчивость развилась, в другом — процесс скольжения быстро затух. Это свидетельствует о пороговом характере процесса инициирования оползня динамическим импульсом. При этом поведение системы в окрестности порога может быть в определенной мере случайным.

Анализировать результаты экспериментов удобно на диаграммах “ $PGV-PGA$ ” с нанесенными параметрами воздействия в каждом конкретном опыте. Пример диаграммы для серии экспериментов со склонами из кварцевого песка с углом наклона 55° приведен на рис. 4. По данным, представленным на плоскости $PGV-PGA$, можно приблизительно оценить минимальные асимптотические значения по ускорению $PGA_{\min} \approx 0.42g$ (вертикальная штриховая линия) и по скорости $PGV_{\min} \approx 0.13$ м/с (горизонтальная штриховая линия), ниже которых разрушения склона при однократном воздействии не происходит.

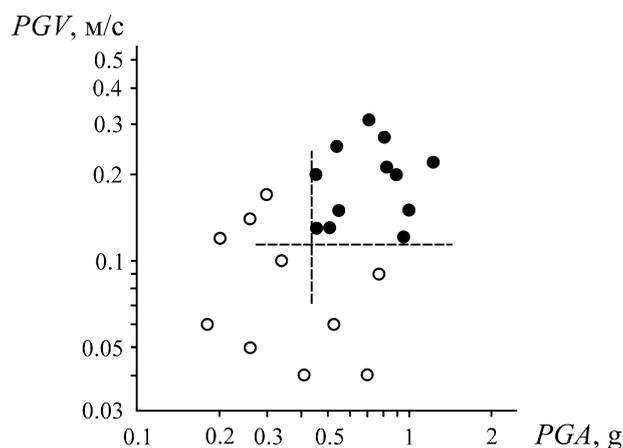


Рис. 4. Результаты экспериментов со склонами из кварцевого песка: \circ — устойчивый склон, \bullet — разрушенный

Полученные результаты для однократных воздействий обобщены на рис. 5 и 6. На рис. 5 каждая линия отделяет область плоскости $PGV-PGA$, в которой наблюдается разрушение соответствующего склона (выше линии). В точках, лежащих ниже линии, склон при однократном импульсном воздействии остается устойчивым. Чтобы не перегружать рисунок, значками на графике показана лишь часть экспериментальных данных. Для $\alpha = 40^\circ, 46^\circ, 55^\circ$ показаны только те эксперименты, в которых склон был разрушен, а для $\alpha = 59^\circ$, наоборот, результаты измерений в опытах, где разрушение не произошло.

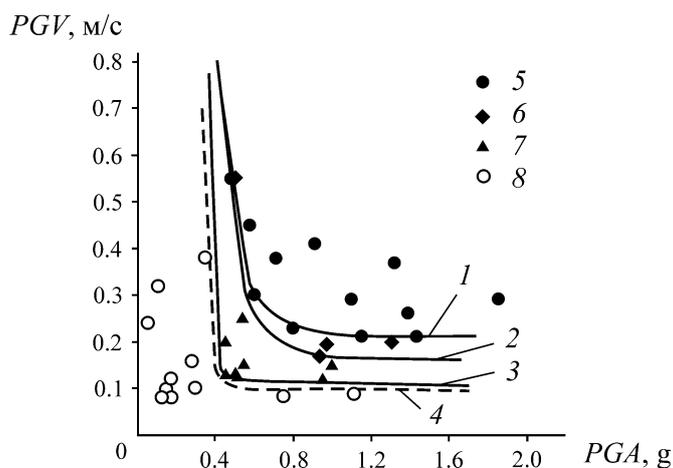


Рис. 5. Обобщающие результаты экспериментов: $\bullet, \blacklozenge, \blacktriangle$ — опыты с разрушением; \circ — опыты, в которых склон оставался целым; 1, 5 — $\alpha = 40^\circ$; 2, 6 — $\alpha = 46^\circ$; 3, 7 — $\alpha = 55^\circ$; 4, 8 — $\alpha = 59^\circ$

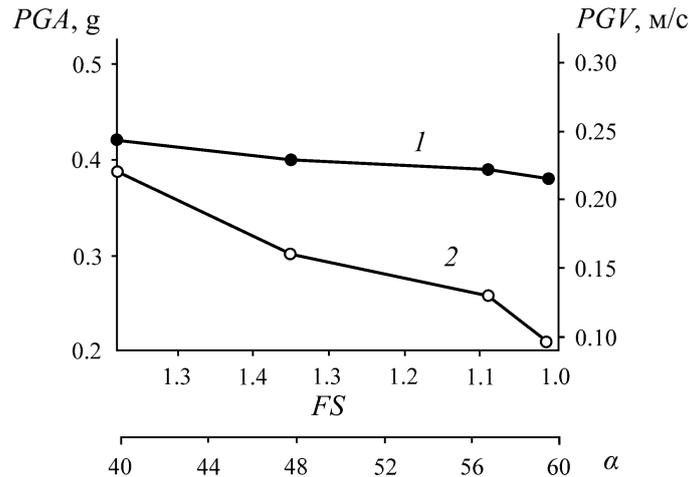


Рис. 6. Зависимость PGA_{min} (1) и PGV_{min} (2) от коэффициента устойчивости склона. Для удобства на нижней оси абсцисс указаны соответствующие значения угла откоса

На рис. 6 показаны зависимости PGA_{min} и PGV_{min} от угла склона и коэффициента устойчивости склона FS , который рассчитывался по соотношению (5). Видно, что значения PGA_{min} близки для склонов с разными углами. Если максимальное ускорение в динамическом импульсе ниже, чем PGA_{min} , то склон остается устойчивым даже при высоких скоростях смещения грунта. В то же время однократное воздействие импульсом с $PGA > PGA_{min}$, но низким значением $PGV < PGV_{min}$ не инициирует оползень. Высокий уровень ускорений в сейсмической волне приводит к локальным разрушениям материала и возникновению остаточных деформаций, которые, накапливаясь, могут перевести склон в неустойчивое состояние.

Ниже приведены результаты опытов с воздействиями на склоны из кварцевого песка, увлажненного глицерином, и рассчитанные по соотношению (5) коэффициенты статической устойчивости склона FS , а также вычисленного по соотношению (6) критического ускорения a_c , при котором склон в квазистатической схеме должен становиться неустойчивым:

Угол, град	59	55	46	40
PGV_{min} , м/с	0.095	0.13	0.16	0.22
PGA_{min} , г	0.380	0.39	0.40	0.42
FS	1.010	1.09	1.35	1.58
a_c , г	0.010	0.07	0.22	0.31
PGA_{min} / a_c	38	5.6	1.81	1.35

Если для крутых склонов с небольшим запасом устойчивости значение PGA_{min} существенно выше значения a_c , определенного по квазистатической схеме, то с ростом запаса устойчивости отношение PGA_{min} / a_c довольно быстро снижается. Для пологих склонов инициирование оползня в большей степени определяется уже значением PGV .

Опыты с многократным воздействием. Как отмечалось, при $PGA > PGA_{min}$ многократное воздействие вызывает постепенное накопление деформаций, которое в конечном итоге может привести к обрушению склона. Для визуализации картины деформирования склона при многократных воздействиях горизонтальная часть модели размечалась реперными линиями из порошка черной глины. Расстояние между линиями составляло 4 см. Измеряя величину смещения каждой из реперных линий, можно получить представление о деформации склона.

На рис. 7 для примера приведены смещения реперных линий на столовой поверхности склона с углом 52° при 6, 7 и 8 ударах с измеренными параметрами динамического импульса $PGA = 0.4g$, $PGV = 0.2$ м/с.

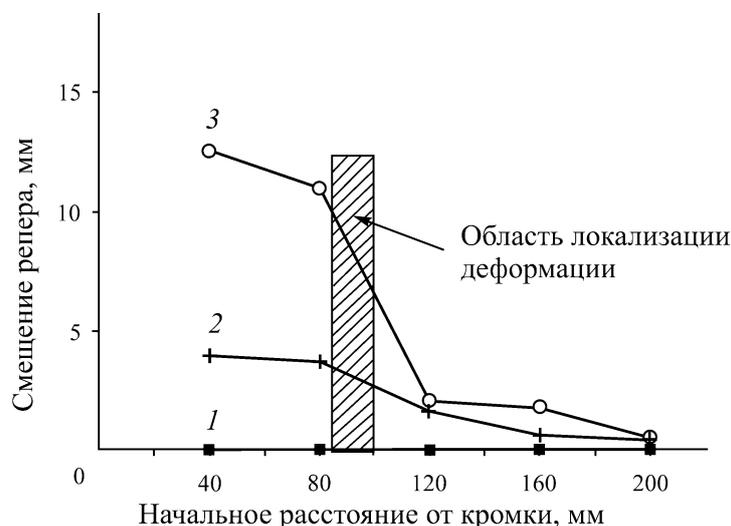


Рис. 7. Смещение реперной линии на разных расстояниях от кромки склона при многократных воздействиях после 6 (1), 7 (2) и 8 ударов (3)

Отметим, что при больших уровнях деформации смещение вдоль реперной линии варьировалось, поэтому на рис. 7 показаны средние значения. В этом опыте вплоть до шестого воздействия величины смещения нигде не превышают точность измерений (~ 1 мм). В результате седьмого удара формируется область локализации деформации — будущая поверхность скольжения, которая выходит на свободную поверхность на расстоянии 80–100 мм от края. При следующем, восьмом, воздействии склон теряет устойчивость, и образуется оползень.

Диаграммы $PGA - PGV$ для многократных воздействий приведены на рис. 8. Заметим, что при многократном воздействии для разрушения склона требуются заметно более низкие параметры, чем при одиночном ударе. Сопоставление диаграмм на рис. 5 и 8 показывает, что для пологих склонов (рис. 8а, б) значение PGA_{min} оказывается примерно одинаковым при многократных и одиночных воздействиях. Для крутых склонов с низким запасом устойчивости (рис. 6в, г) значение PGA , при котором склон не разрушается даже при большом числе ударов, оказывается заметно ниже, чем значение PGA_{min} для одиночного удара. Для всех склонов при многократном воздействии отмечено резкое снижение максимальной скорости смещения грунта, требуемой для обрушения склона при тех же ускорениях. Если уровень ускорений в импульсе достаточен для возникновения локальных разрушений материала, то в модели возникают остаточные деформации; тем большие, чем больше значение PGV . В конце концов склон теряет устойчивость и формируется оползень. По всей вероятности, в этих экспериментах не был достигнут нижний предел PGV , ограничивающий эффект накопления в случае $PGA > PGA_{min}$, что связано с возможностями установки.

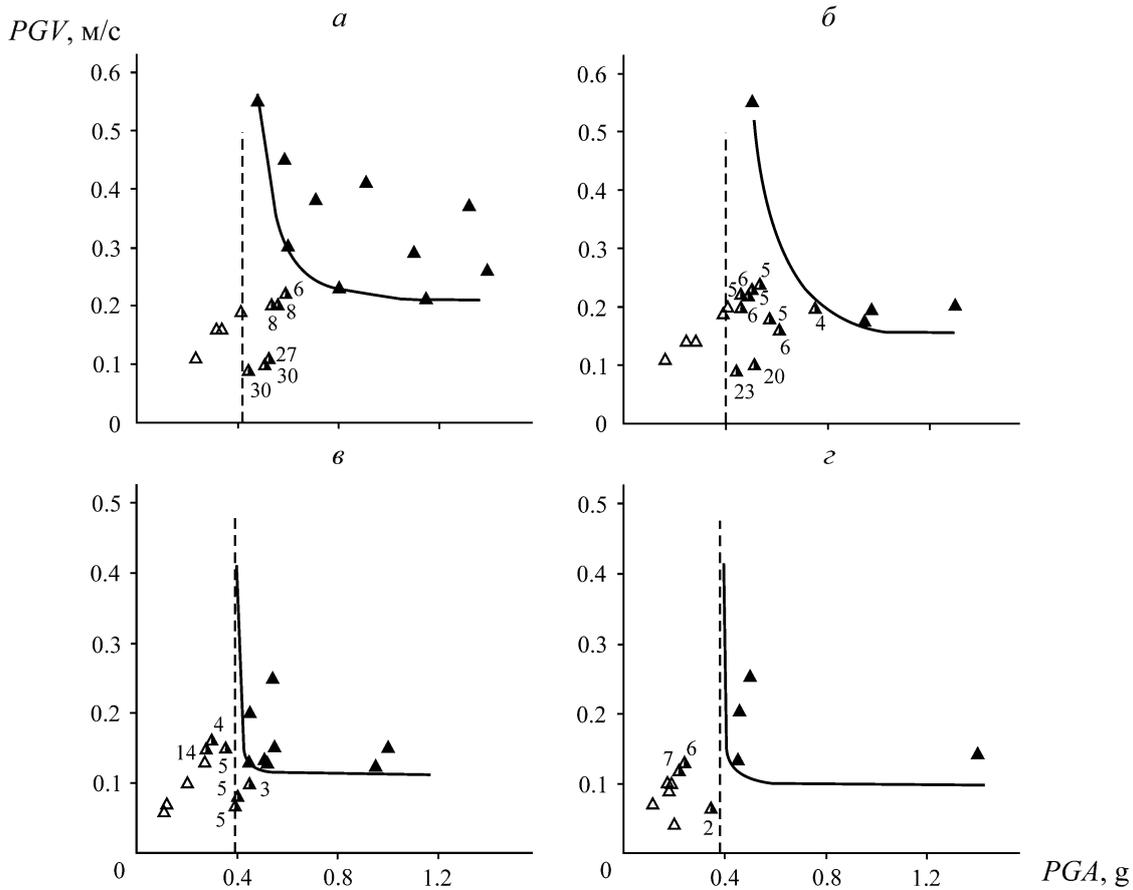


Рис. 8. Фрагменты диаграмм “ $PGA - PGV$ ” для многократных воздействий на склоны из кварцевого песка: \blacktriangle — склон разрушен при первом воздействии; \blacktriangle — склон разрушен после нескольких воздействий; цифра у каждого значка — количество ударов; \triangle — склон остался устойчивым после 30–40 ударов. Углы склонов: a — 40° ; $б$ — 46° ; $в$ — 55° ; $г$ — 59° . Сплошные линии — границы, разделяющие области устойчивости и неустойчивости при однократном воздействии (см. рис. 5); штриховые — критическое ускорение PGA_{min} для однократного воздействия

По мере снижения PGV накопление деформации происходит все медленнее. На рис. 9а приведены результаты измерений для склона с углом 46° . Если при $PGV \sim 0.15 - 0.20$ м/с оползень возникает после 4–6 воздействий, то при снижении максимальной скорости в сейсмическом импульсе до 0.10 м/с для разрушения склона уже требуется 22 удара. При повышении запаса устойчивости FS склон остается устойчивым при больших кумулятивных деформациях, а для его разрушения требуется все увеличивающееся количество повторных воздействий (рис. 9б).

Выполненные лабораторные эксперименты позволили обнаружить важный эффект, который следует учитывать при расчете устойчивости склонов, подверженных динамическому воздействию. Установлено, что при импульсном воздействии критическое значение ускорения в волне PGA_{min} , при котором склон теряет устойчивость, определяется главным образом прочностными характеристиками грунта и слабо зависит от угла склона. Это свидетельствует о необходимости корректировки квазистатического подхода к оценке сейсмической устойчивости склонов. Поправочный коэффициент к максимальному значению горизонтального ускорения в сейсмической волне, который обычно вводится в расчетах при учете инерциальных сил [11], должен зависеть от угла склона.

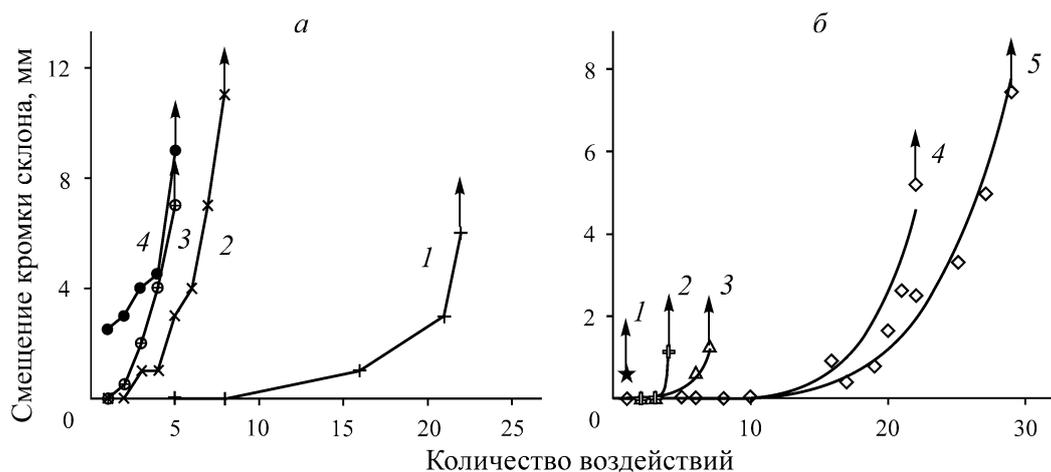


Рис. 9. Смещение кромки склона при многократных воздействиях. Стрелками отмечена стадия обрушения: *a* — деформация и разрушение склона с углом 46° при разных амплитудах многократных воздействий: 1 — $PGA=0.45g$; $PGV=0.10$ м/с; 2 — $PGA=0.41g$; $PGV=0.17$ м/с; 3 — $PGA=0.55g$; $PGV=0.15$ м/с; 4 — $PGA=0.05g$; $PGV=0.22$ м/с; *б* — деформация и разрушение склонов с различными углами при многократных воздействиях импульсами с одними и теми же параметрами $PGA=0.40-0.45g$; $PGV=0.08-0.10$ м/с: 1 — 59° , 2 — 55° , 3 — 52° , 4 — 46° , 5 — 40°

Помимо ускорения, важным параметром является максимальная скорость смещения грунта PGV в сейсмической волне. В отличие от PGA_{min} , критическое значение этого параметра существенно возрастает по мере снижения угла склона. После разрушения инерциальными силами, материал в теле оползня должен набрать определенную величину деформации для снижения сопротивления сдвигу; тем большую, чем выше коэффициент статической устойчивости.

Опыты с многократным воздействием демонстрируют, что критическое перемещение практически не зависит от параметров воздействия и определяется свойствами грунта и геометрией склона. При многократном воздействии, к которому в некотором приближении можно отнести воздействие длинным цугом колебаний, критические параметры, как и ожидается, заметно снижаются по сравнению с одиночным импульсом. Особенно это касается крутых склонов с малыми коэффициентами устойчивости (рис. 8*в*, *г*), для которых снижаются критические скорости и ускорения. Если значение PGA_{min} превышено (материал склона получил повреждения), критическое перемещение, после которого происходит обрушение, может набираться в течение большого количества циклов.

Обсуждение закономерностей постепенного накопления деформаций требует отдельного рассмотрения и выходит за пределы данной публикации. Отметим лишь, что, как и во многих других процессах установившейся ползучести, средняя скорость деформации должна быть достаточно велика. В противном случае процесс постепенно затухает [15].

В инженерных методиках оценки устойчивости склона при сейсмическом воздействии землетрясений и взрывов обычно рассматривается лишь параметр PGA [11]. В исследовательских работах [20], проводится поиск критической массовой скорости в цуге сейсмических колебаний, что предполагает однократное интегрирование ускорений по времени.

Применяя данные о разрушении склонов при землетрясениях различных магнитуд [4] и используя эмпирические зависимости параметров колебаний от эпицентрального расстояния $PGA(R)$ и $PGV(R)$ [21–23], выполнена оценка параметров сейсмических воздействий, ниже которых разрушения склонов в виде оползней не регистрировались (данные о камнепадах и осыпях не использовались). Параметры колебаний оценивались с помощью соотношений

$$\log_{10}(PGA) = 0.299 + 0.299(M - 6) - 1.052 \log_{10} R + 0.112\Gamma,$$

$$\log_{10}(PGV) = -0.828 + 0.489M - \log_{10} R + 0.116,$$

где R — гипоцентральное расстояние, км; M — его магнитуда; Γ — параметр, зависящий от рыхлости породы (для рыхлых — 1, для крепких — 0).

Результаты расчета минимальных критических параметров колебаний для землетрясений магнитудами 4.5–7.0 приведены на рис. 10 значками-плюсами, а для контроля значками-треугольниками — измеренные значения PGA – PGV в окрестности обрушившихся склонов, заимствованные из [24]. Видно, что результаты инструментальных измерений в основном лежат выше расчетных минимальных значений. Просматривается тенденция роста критических параметров для землетрясений меньших магнитуд, что связано с увеличением частоты и более коротким цугом колебаний.

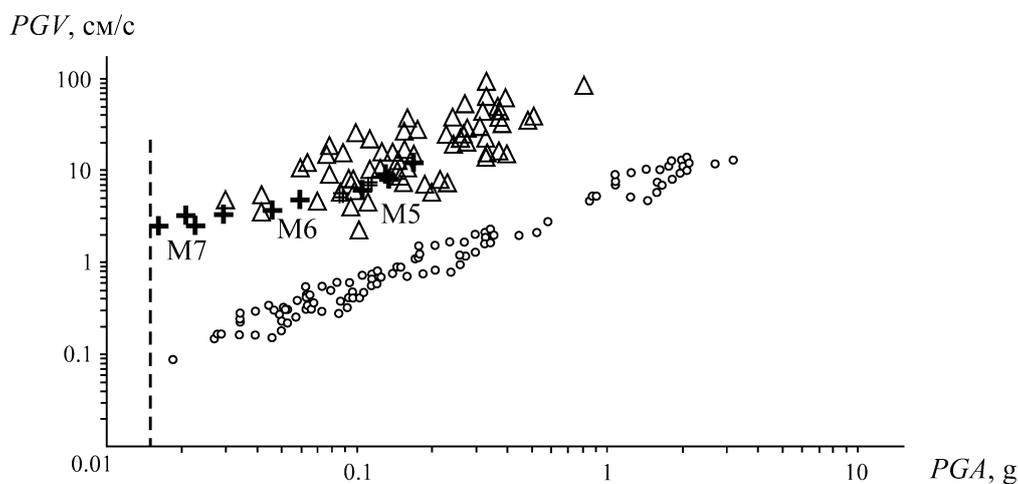


Рис. 10. Зависимость PGA – PGV для разных источников событий (пояснения в тексте)

Опираясь на полученную зависимость, считаем, что $a_c = 0.013–0.015g$ является нижним пределом ускорений, которые вызывают появление нарушений в геоматериале реальных склонов, поскольку этот параметр не должен зависеть от магнитуды или периода события. На рис. 10 в виде точек приведены результаты расчета параметров колебаний от массовых взрывов. Расчеты выполнены по данным инструментальных наблюдений на карьере Лебединского ГОК для расстояний 150–1500 м от ближайшего взрываемого блока. Используются параметры массовых взрывов, проводившихся в 2019–2021 гг. с разной конфигурацией зарядов. Максимальные ускорения в сейсмической волне на расстояниях ~ 1000 м, где могут располагаться отвалы рыхлой вскрыши и некондиционных полезных ископаемых, достигают весьма значительных величин 0.1–0.8g. Однако максимальная скорость смещения грунта при этом небольшая (не более 2–3 см/с). Углы склонов в отвалах близки к углу естественного откоса, т. е. коэффициент статической устойчивости FS невелик. В силу этого многократность воздействия может снизить в соответствии с результатами лабораторных опытов значение критических параметров в 1.5–2.0 раза. Сейсмическая магнитуда массовых взрывов на Курской магнитной аномалии не превышает 2.8–3.0. В соответствии с данными рис. 10 можно с уверенностью полагать, что сейсмозрывное воздействие радикально не повлияет на откосы вблизи карьера. Известный для землетрясений эффект усиления амплитуды колебаний на склоне существенного влияния на такие отвалы не окажет из-за широкого спектра сейсмозрывных волн [25]. Поскольку пи-

ковое ускорение явно превышает критические значения, можно ожидать, что в материале склона будут постепенно накапливаться повреждения. Так что склоновые явления на отвалах рыхлых пород вблизи карьеров необходимо контролировать.

ВЫВОДЫ

При динамическом воздействии на склон существуют минимальные параметры максимальных ускорений в волне PGA_{\min} и скорости смещения грунта PGV_{\min} , ниже которых обрушения не происходит. Значения PGA_{\min} практически не зависят от угла склона и определяются лишь прочностными характеристиками материала. Высокий уровень ускорений в волне $PGA > PGA_{\min}$ приводит к локальным разрушениям материала и возникновению остаточных деформаций. Возможность инициирования оползня в значительной степени определяется максимальной скоростью смещения материала PGV , критическое значение которой сильно снижается с увеличением угла склона.

Для крутых склонов с небольшим запасом устойчивости значение PGA_{\min} существенно выше значений a_c , определяемых по квазистатической схеме, чем для пологих склонов. Это свидетельствует о необходимости корректировки квазистатического подхода при оценке сейсмической устойчивости склонов.

Для всех склонов при многократном воздействии отмечено резкое снижение максимальной скорости смещения грунта, требуемой для обрушения склона при тех же ускорениях. По мере снижения PGV , накопление деформации при многократном воздействии происходит все медленнее. При высоких коэффициентах устойчивости FS склон остается устойчивым даже при больших кумулятивных деформациях.

Выполненный анализ данных об обрушении природных склонов и земляных откосов при землетрясениях и сопоставление результатов с измеренными параметрами колебаний при массовых взрывах в карьере Лебединского ГОКа показал, что сейсмозрывное воздействие не оказывает радикального влияния на откосы вблизи карьера. В то же время из-за высоких пиковых ускорений можно ожидать постепенного накопления повреждений в материале склонов. Скорость накопления деформаций оценить в настоящее время невозможно из-за недостатка данных. Хотя с высокой вероятностью этот процесс затухает со временем, склоновые явления на отвалах рыхлых пород вблизи карьеров необходимо периодически контролировать для принятия необходимых мер в случае нарастания скорости деформации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Newmark N. M. Effects of earthquakes on dams and embankments, *Geotechnique*, 1965, Vol. 15, No. 2. — P. 139–160.
2. Strom A., Lan H., and Li L. Rock avalanche mobility: optimal characterization and the effects of confinement, *Landslides*, 2019, Vol. 16, No. 8. — P. 1437–1452.
3. Wilson R. C. and Keefer D. K. Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyote Lake, California, earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1983, Vol. 73. — P. 863–877.
4. Keefer D. K. Landslides caused by earthquakes, *GSA Bulletin*, 1984, Vol. 95, No. 4. — P. 406–421.
5. Мельников Н. Н., Козырев А. А., Лукичев С. В. Новая концепция разработки месторождений глубокими карьерами // *Горн. журн.* — 2009. — № 11. — С. 7–11.
6. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. — М.: Недра, 1965. — 378 с.
7. Яковлев Д. В., Цирель С. В., Зуев Б. Ю., Павлович А. А. Влияние землетрясений на устойчивость бортов карьеров // *ФТПРПИ.* — 2012. — № 4. — С. 3–19.

8. **Цирель С. В., Павлович А. А.** Проблемы и пути развития методов геомеханического обоснования параметров бортов карьеров // Горн. журн. — 2017. — № 7. — С. 39–45.
9. **Wilson R. C. and Keefer D. K.** Predicting areal limits of earthquake-induced landsliding. Earthquake hazards in the Los Angeles region — an Earth-science perspective, U. S. Geol. Survey Profes., ed. J. I. Ziony, 1985. — P. 317–345.
10. **Храмцов Б. А., Бакарас М. В., Кравченко А. С., Корнейчук М. А.** Управление устойчивостью отвалов рыхлой вскрыши железорудных карьеров КМА // ГИАБ. — 2018. — № 2. — С. 66–72.
11. **ОДМ 218.2.006-2010.** Рекомендации по расчету устойчивости оползнеопасных склонов (откосов) и определению оползневых давлений на инженерные сооружения автомобильных дорог, 2010. — 116 с.
12. **Dieterich J. H.** Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations, J. Geophys. Res., 1979, Vol. 84. — P. 2161–2168.
13. **Arnold L.** Seismically-induced rock-slope failure: numerical investigations using the bonded particle model, PhD dissertation, University of Washington, 2016.
14. **Павлов Д. В., Шарафиев З. З.** Методика лабораторного исследования устойчивости склона при импульсном динамическом воздействии. Динамические процессы в геосферах. — М.: Геос, 2020. — С. 53–62.
15. **Кочарян Г. Г., Беседина А. Н., Кишкина С. Б., Павлов Д. В., Шарафиев З. З., Каменев П. А.** Иницирование обрушения склона сейсмическими колебаниями от разных источников // Физика Земли. — 2021. — № 5. — С. 41–54.
16. **Седов Л. И.** Механика сплошной среды. Т. 1. — М.: Наука, 1976. — 492 с.
17. **Адушкин В. В., Орленко Т. А.** Прочностные характеристики разуплотнения песчаного грунта при сдвиге // Механика твердого тела. — 1971. — № 2. — С. 167–171.
18. **ГОСТ 12248-2010.** Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. — М.: Стандартинформ, 2011.
19. **Кочарян Г. Г., Спивак А. А.** Динамика деформирования блочных массивов горных пород. — М.: ИКЦ “Академкнига”, 2003. — 423 с.
20. **Bullock Z., Dashti S., Liel A., Porter K., Karimi Z., and Bradley B.** Ground-motion prediction equations for arias intensity, cumulative absolute velocity, and peak incremental ground velocity for rock sites in different tectonic environments, Bull. Seismol. Soc. Am., 2017, Vol. 107. — P. 2293–2309.
21. **Boore D. M., Joyner W. B., and Fumal D. E.** Estimation of response spectra and peak accelerations from western North America earthquakes: an interim report, Open-File-Report, US Geological Survey, Reston, VA, 1993. — 72 p.
22. **Sabetta F. and Pugliese A.** Estimation of response spectra and simulation of nonstationary ground motions, Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, Vol. 86, No. 2. — P. 337–352.
23. **Carro M., Amicis M. De, Luzi L., and Marzorati S.** The application of predictive modeling techniques to landslides induced by earthquakes: the case study of the 26 September 1997 Umbria — Marche earthquake (Italy), Eng. Geol., 2003, Vol. 69. — P. 139–159.
24. **Jibson R. W., Rathje E. M., Jibson M. W., and Lee Y. W.** SLAMMER — seismic landslide movement modeled using earthquake records, U. S., Geological Survey Techniques and Methods, 2013. DOI: 10.3133/TM/2B1.
25. **Эртелева О. О.** Спектры реакции в скоростях: оценки параметров и формы // Вопросы инженерной сейсмологии. — 2015. — Т. 42. — № 4. — С. 5–14.

*Поступила в редакцию 01/XI 2021
После доработки 10/XI 2021
Принята к публикации 11/XI 2021*